

нагрівання, то робота місцевої витяжної вентиляції не впливає на розподіл температурних полів у нижній зоні нагрівання.

Подяка. Автори вдячні НАТО, зокрема проекту No ESP.NUKR.CLG.982978 “ Оцінка та сертифікація довкілля будівель” та агентству Grant Словацької Республіки, за підтримку проекту No 1/3342/06, на основі якого наведено результати.

1. Захаров А.А. *Применение тепла в сельском хозяйстве.* – М.: Колос, 1980. – 310 с. 2. Сподинок Н.А., Желих В.М., Юркевич Ю.С. *Аналіз параметрів мікроклімату приміщень з інфрачервоним опаленням в робочій зоні / Вісник НУ «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва».* – 2007. – №600.

УДК 624.131.1

Г.І. Черний, Б.В. Моркляник

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра мостів та будівельної механіки

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАБИВАННЯ ТА ВІБРОЗАНУРЕННЯ ПАЛІ В ҐРУНТИ РІЗНОЇ ВОЛОГОСТІ

© Черний Г.І., Моркляник Б.В., 2008

Розглянуто залежність ефективності забивання та віброзанурення палі від вологості ґрунту. Показано, що витрати роботи на забивання і на віброзанурення палі різко зростають зі зниженням вологості, і в сухих ґрунтах ці процеси часто неможливі. Отримані результати придатні для розроблення інженерних формул.

Dependence of efficiency of hammering and vibroimmersion of piles from humidity of soil is considered. In the article is shown that work expenses for hammering and vibroimmersion of piles abruptly increase when soil humidity declines. Due to the mentioned fact these processes are often impossible in dry soils. Obtained results are suitable for development of engineering formulas.

Забивання та віброзанурення палі у ґрунтовий масив – поширені методи зведення палевих фундаментів в практиці будівництва. Їх особливістю є те, що в обох випадках виїмка ґрунту не проводиться. Ґрунт, який витісняє паля, йде на ущільнення навколишнього масиву, що підвищує його несучу здатність. Майже увесь він розміщується за боковою поверхнею палі, в незначному об’ємі – під її п’ятою, оскільки останнє є незворотним лише на останній стадії занурення. До того ґрунт з під п’яти також переміщається за бокову поверхню палі, і ущільнює масив біля неї.

Довжина палі, яку забивають або занурюють в ґрунт, переважно у декілька разів більша від її діаметра. Тому незначним об’ємом ґрунту, що на завершальному етапі витрачається на ущільнення масиву не за боковою поверхнею, а під п’ятою палі, під час дослідження занурення можна знехтувати. За такого підходу задача зводиться до вісесиметричної.

Циліндричну зону об’ємної деформації ґрунту навколо палі створює серія кільцевих поздовжніх хвиль стиснення циліндричної симетрії, що послідовно розповсюджуються по ґрунту від палі як джерела збудження. Пластична хвиля, що здійснює необоротну деформацію ґрунту, виникає у нижньому кінці палі при ударі по палі або за вібраційного поштовху. Virізняє ці хвилі лише частота і рівень напруг на фронті, а за формою утворення і характером дії на ґрунт вони ідентичні. Це уможливорює для забивання і віброзанурення мати єдиний апарат розрахункових формул, хоча і з різними числовими коефіцієнтами.

Кожна хвиля розходитьсь по ґрунту, здійснюючи об'ємну деформацію. На певній відстані від джерела збудження рівень напруження на її фронті знижується, незворотна деформація припиняється. Оскільки в ущільненому ґрунті коефіцієнт затухання хвиль менш значний, ніж у неущільненому, границя припинення ущільнення з кожною хвилею відсувається далі від контуру палі. Процес завершається, коли палі заглибитися на певну глибину і зона розповсюдження хвиль стиснення від її нижнього кінця палі пересунеться вниз по масиву ґрунту.

За динамічного занурення у ґрунт палі, одночасно з хвилями у нижньому кінці, генерує хвилі вздовж усієї бокової поверхні. Це також хвилі циліндричної симетрії, вони розповсюджуються по ґрунту в напрямку від палі і затухають на певній відстані. Але це не пластичні поздовжні хвилі стиснення, а поперечні зсувні пружні, що незворотної деформації не здійснюють. Уся їхня енергія витрачається на теплові втрати. При цьому вони утруднюють забивання та віброзанурення палі, роблячи їх за значної довжини палі неможливими. Під час дослідження, перервну дію серії імпульсних хвильових навантажень на ґрунт може бути замінено дією еквівалентних квазістатичних навантажень.

За рівнем напружень динамічні і статичні навантаження на ґрунт прийнято поділяти на пластичні, коли високі напруження призводять до незворотної об'ємної деформації, і пружні, коли ґрунт повертає первинну щільність [4, 5]. Але це стосується процесів, де навантаження змінює розвантаження. Навколо палі ущільнення ґрунту завжди є незворотним, оскільки розвантаження відбутися не може. Щільність, набута ґрунтом при проходженні хвилі стиснення, залишається незмінною, тому цю хвилю можна вважати пластичною, незалежно від рівня напружень. Цим ущільнення ґрунту навколо палі подібне до ущільнення під будівлями під час осідання споруд, де також незалежно від співвідношення тиску на ґрунт і за межами пружності об'ємна деформація незворотна. Ця особливість дає змогу застосовувати теорію лінійної деформації ґрунту, що описує гілку навантаження незворотного, тобто пластичного деформування ґрунту, апаратом формул теорії пружності під час розрахунків палі, як і осідань будівель.

Подібний до описаного характер деформування з утворенням циліндричної зони ущільненого ґрунту виникає і при вдавлуванні палі, а також під час роботи палі під навантаженням будівлею. Але в цих випадках деформування ґрунту відбувається від дії не хвильового, а квазістатичного навантаження. Різницю визначає те, що за швидкого перебігу процесу відбувається неконсолідаційне стиснення ґрунту за рахунок скорочення порового простору за постійної вологості ($W = \text{const}$). За постійного або повільного навантаження ущільнення ґрунту консолідаційне за рахунок витіснення води з напружених зон зі зниженням вологості ($W \neq \text{const}$).

Це визначає різний рівень напруг, що відповідає однаковим деформаціям. Відношення модулів деформацій ґрунту за швидкого динамічного і тривалого статичного навантаження E_d і E відоме як коефіцієнт динамічності k_d :

$$k_d = E_d / E . \quad (1)$$

Його величина залежно від швидкості зростання напружень за динамічного навантаження і тривалості імпульсу змінюється від 1,4 – 1,6 до 3–4 [5].

Зазначені модулі відповідають співвідношенням напружень і деформацій лише до певних рівнів останніх, що відповідають повному закриттю порового простору, вільного у першому, і загального у другому випадку. Після цього об'ємна деформація ґрунту практично не відбувається, оскільки вона можлива лише за рахунок стиснення води і мінеральних часток за дуже високих напружень і модулів. Тому навколо бічних поверхонь палі може утворитися зона гранично ущільненого ґрунту з повним закриттям пор.

За формою перебігу під час забивання та віброзанурення палі ущільнення ґрунту відбувається принципово так само, як за дії внутрішніх камуфлетних вибухів. Різниця між результатами їх дій проявляється лише у зоні, що прилягає до камуфлетної порожнини, виникає розвантаження в бік порожнини. Але під час досліджень деформування ґрунту при вибуху цим переважно нехтують. Тому закономірності затухання і дії на ґрунт поздовжніх хвиль стиснення під час камуфлетних вибухів, описані в [1], можуть бути використані під час описання затухання тих самих хвиль і їх дії

під час забивання і віброзанурення палі. Відповідні поправки слід ввести лише під час кількісних розрахунків, оскільки за меншої швидкості зростання напружень під час забивання і віброзанурення палі чисельна величина коефіцієнта динамічності дещо менша, ніж під час вибухів.

На рис. 1 показано об'ємну деформацію ґрунту навколо палі, А – в сухих ґрунтах за малих діаметрів палі, де немає зони повного закриття вільних пор, Б – у щільних вологих ґрунтах і за великих діаметрів палі, де така зона є.

Отже, різницю між закономірностями перебігу об'ємної деформації становить наявність на схемі Б зони повного ущільнення 1, де хвиля стиснення здійснює повне закриття вільних пор. За незначної зміни об'ємну деформацію можна приймати постійною, такою, що дорівнює θ_* .

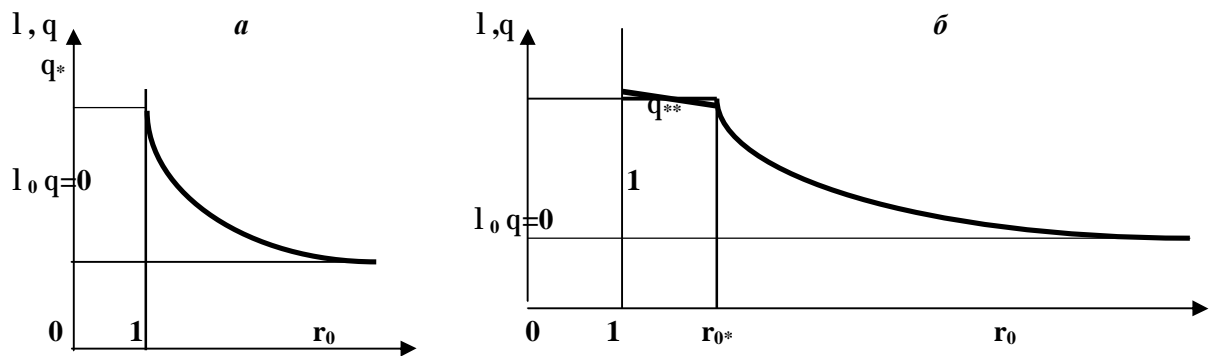


Рис. 1. Зміни об'ємної деформації ґрунту з відстанню від палі: а – за відсутності зони повного закриття вільних пор; б – за її наявності

Графік А описує формула

$$\theta(r_0) = \theta_* r_0^{-\nu} \quad \text{за } r_0 \geq 1 \quad \theta_* = \theta(1). \quad (1)$$

Відповідно графік Б може бути описаний двома формулами:

$$\theta(r_0) = \begin{cases} \theta_* = \text{const} & \text{за } 1 \leq r_0 \leq r_{0*} \\ \theta_* r_0^{-\nu} & \text{за } r_0 \geq r_{0*} \end{cases} \quad \theta_* = \theta(1), \quad (2)$$

де r_0 – виражена у радіусах палі r_n безрозмірна відстань від осі палі ($r_0 = r / r_n$); θ_* – гранична об'ємна деформація за повного закриття пор; r_{0*} – безрозмірний (в радіусах палі) радіус зони повного закриття пор; ν – показник затухання об'ємної деформації, що згідно з [6] дорівнює

$$\nu = 2\theta_* + 2. \quad (3)$$

За наведеними вище формулами після експериментального визначення відповідних коефіцієнтів можуть бути встановлені величини напружень і деформацій на різних відстанях від палі у ґрунтах різної вологості. Але це ще не дає змоги визначити вплив вологості ґрунту на ефективність забивання і віброзанурення палі, оскільки не може бути встановлена залежність опору ґрунту від його напружено-деформованого стану. Однак це може бути зроблено визначенням витрат енергії на роботу з деформування ґрунту під час перебігу зазначених процесів. Методику такого визначення наведено у [1, 6].

Наведемо основні положення визначення роботи об'ємного деформування ґрунту в масиві під час забивання і віброзанурення палі. Елементарна робота dA ущільнення об'єму ґрунту dV під час забивання палі на глибину h визначається через об'ємну деформацію ґрунту θ та сумарні напруги P , що мають статичні і динамічні складові:

$$dA = P \theta dV. \quad (4)$$

Визначимо компоненти напруг σ_1 , σ_2 і σ_3 через об'ємну деформацію і пружні показники ґрунту: модуль деформації E і коефіцієнт бічного тиску μ :

$$\sigma_1 = \mu\sigma_2 = \mu\sigma_3 = E\epsilon_1, \quad P = \sigma_1(1 + 2\mu)/3 = E\theta(1 + 2\mu)/3. \quad (5)$$

З урахуванням (1) і (5) елементарна робота dA ущільнення об'єму ґрунту dV за відсутності зони повного закриття пор дорівнює

$$dA = E (1 + 2\mu)\theta_*^2 r_0^{-2\nu} dV / 3. \quad (6)$$

Сумарну роботу об'ємної деформації шару ґрунту заввишки Δh визначимо інтегруванням (6) в межах від $r_0=1$ до $r_0=\infty$. Вона становитиме

$$\Sigma A = 2\pi r_n^2 \Delta h E (1+2\mu)\theta_*^2 / (1+4\theta_*). \quad (7)$$

Аналогічно визначимо сумарну роботу деформації за наявності зони повного ущільнення ґрунту. Тут інтегрування слід провести на обох ділянках окремо, а результати підсумувати. Кінцева формула має вигляд

$$\Sigma A = 2\pi r_n^2 \Delta h E (1+2\mu)\theta_* [\theta_* / (1+4\theta_*) + r_0^{\nu} \theta_* / 2]. \quad (8)$$

Для аналізу залежності роботи ущільнення від вологості ґрунту розпишемо праву частину формули (7) у вигляді трьох співмножників, два з яких не залежать, а один, який назовемо K_b , залежить від вологості ґрунту:

$$\Sigma A = 6,28 r_n^2 \Delta h K_b, \quad K_b = E (1+2\mu)\theta_*^2 / (1+4\theta_*). \quad (9)$$

З формул (7) – (9) можна зробити висновок, що вологість ґрунту впливає на ефективність забивання та віброзанурення палів за рахунок різних витрат енергії на роботу об'ємного деформування ґрунту за динамічних навантажень. Така сама залежність від вологості об'ємного деформування елементарного об'єму ґрунту за динамічного навантаження проявляється і за інших форм перебігу цього процесу. Одержати відповідні коефіцієнти можна, коли навантаження здійснюється плоскою хвилею стиснення. У цьому випадку вплив вологості виявляється яскравіше, оскільки величина об'ємної деформації не залежить від відстані до джерела збудження і на неї не впливає дивергенція, притаманна хвилям стиснення циліндричної симетрії, як в нашому випадку.

Наведемо узагальнені результати наших експериментів, що характеризують вплив вологості на величину об'ємної деформації від динамічних навантажень в умовах простого деформованого стану, за неможливості бічного розширення і витіснення порової води та на обсяг потрібної для досягнення певного рівня об'ємної деформації роботи динамічного імпульсу. Відповідно до цих умов в наших експериментах застосовано методику, аналогічну до описаної в [5], де за ударного навантаження деформування ґрунту відбувалось також в умовах неможливості бокового розширення та витоку води. Але на відміну від [5], де застосовувались одноразові з великим рівнем напруг навантаження, наближені до вибухових, в наших експериментах динамічні навантаження імітували удари палі під час забивання та поштовхи під час віброзанурення, тому були багаторазовими з менш значним, ніж у [5], рівнем напружень.

Під час експериментів удар здійснювало падіння вантажу вагою 5 кг з висоти 2 м. Діаметр зразка циліндричної форми становив 5 см, висота – 5 см, лінійна деформація вимірювалась після удару накладним датчиком часового типу. Отже, наші експерименти з багаторазовими навантаженнями зразка ґрунту були дещо схожі на експерименти [2], але на відміну від них у нас вільного витоку води з ґрунту в проміжки між ударами не було, а зворотному ходу поршня після удару запобігав храповик. Випробування були проведені на легкому суглинку порушеної структури з загальною пористістю 0,39, ваговою вологістю – 3,9, 7,2, 11,2 і 16,1%. Принципові результати показано на графіках рис. 2.

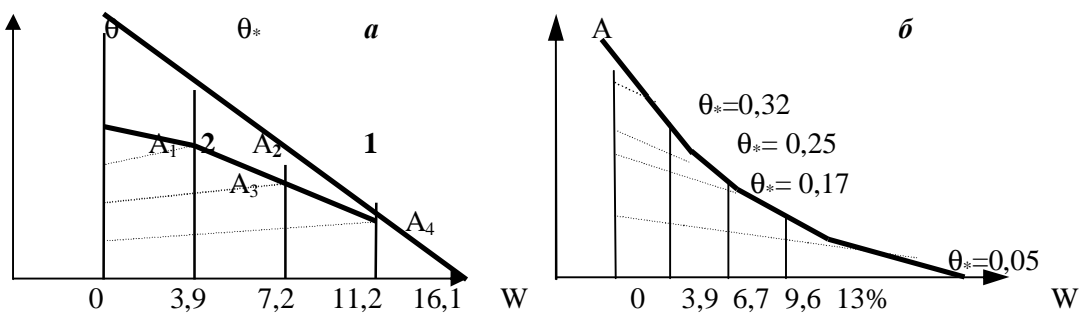


Рис. 2. Графіки залежності об'ємна деформація-вологість (а) і робота з деформування - вологість (б); на схемі А пряма 1 – гранична деформація ґрунту різної вологості, крива 2 – деформація, яку досягнуто під час експериментів

На графіку *a* штриховими лініями показано рівні об'ємної деформації ґрунтів різної вологості θ за однакової роботи динамічних імпульсів *A*. Вона визначалась за кількістю ударних навантажень. Усього їх було зроблено при $A_1 - 19$, $A_2 - 14$, $A_3 - 8$, $A_4 - 4$, обсяг роботи стиснення 1 см^3 ґрунту до досягнутого в експериментах рівня відповідно становив 11,4, 8,4, 5,6 та 2,4 джоулів, а розрахунковий рівень, необхідний для досягнення граничної об'ємної деформації з повним закриттям вільних пор, – 20,3, 13,2, 8,0 і 2,7 джоулів.

Відзначимо, що розходження між розрахунковою границею ущільнення ґрунту під час досягнення граничної об'ємної деформації в масиві (що, очевидно, існує при забиванні паль) і досягнутою в зразках під час лабораторних випробувань значною мірою визначає вплив структурної міцності ґрунту, яка відсутня в лабораторних зразках порушеної структури

З наведених на графіках даних бачимо, що хоча розрахована за об'ємом вільних пор гранична величина стиснення ґрунту за зростання вологості зменшується, однак для досягнення однакового рівня деформації у вологих ґрунтах потрібен значно менший обсяг роботи динамічного імпульсу, ніж у сухих.

Виконані за нашою методикою експерименти з наближенням умов ущільнення ґрунту до ущільнення навколо паль дають змогу розрахувати роботу, потрібну для забивання паль в ґрунтах різної вологості. Для цього потрібно визначити питому затрату роботи A_y на ущільнення 1 см^3 ґрунту до граничної об'ємної деформації θ_* :

$$A_y = 2K_B / \theta_* . \quad (10)$$

На основі виконаних за нашою методикою експериментів та наведених формул можна розраховувати роботу, потрібну для забивання і віброзанурення паль в ґрунт різної вологості. Це дасть змогу оцінити межі вологості можливого застосування віброзанурення паль.

Зробимо такі розрахунки питомої роботи A_y і загальної роботи на просування палі ΣA на $\Delta h = 1 \text{ м}$ за її радіуса $r_n = 10 \text{ см}$ для випробуваного ґрунту. Прийняті для розрахунків дані та результати розрахунків для використаних під час експериментів чотирьох рівнів вологості ґрунту зводимо у таблицю.

Результати розрахунку роботи ущільнення ґрунту під час забивання і віброзанурення палі

Вологість $W, \%$	Модуль деформації статичний $E, \text{ кгс/см}^2$	Модуль деформації динамічний $E, \text{ кгс/см}^2$	Коефіцієнт бокового тиску μ	Гранична об'ємна деформація θ_*	Питома робота ущільнення ґрунту $A_y, \text{ дж/см}^3$	Загальна робота просування на 1 м палі $\Sigma A, \text{ дж}$.
3,9	250	1000	0,15	0,32	36,4	366000
7,2	230	900	0,18	0,25	30,7	241000
11,2	2 00	760	0,25	0,17	22,6	119900
16,1	180	600	0,3	0,05	8,1	12700

Висновки:

1. Опір ґрунту зануренню палі за динамічного навантаження за вагової вологості 15–16 % невеликий, що дає змогу застосовувати віброзанурення.
2. За зниження вологості ґрунту від 16,1 до 3,9 % обсяг роботи з забивання палі на 1 пог. м зростає майже у 30 разів.
3. За викладеною методикою можна оцінити області вологості цього ґрунту, у границях яких можливе застосування забивання і віброзанурення паль; це особливо важливо для сухих ґрунтів, де забивання паль потребує дуже великих витрат, а віброзанурення не може бути здійснене.

1. Вовк А.А., Черный Г.И., Кравец В.Г. Действие взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1974. – 207 с. 2. Лебедев А.Ф. Уплотнение грунтов при разной их влажности. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – 42 с. 3. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Госгортехиздат, 1963. 4. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с. 5. Черный Г.И. Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагружениях. – К.: Наук. думка, 1979. – 130 с. 6. Черный Г.И., Титко О.В. Расчеты эффективности кустов свай // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2002. – Вип. 56.